

基于小波变换的心音包络提取算法及应用***

周 酥, 朱 蒂, 吴效明, 黄岳山

Envelope extraction algorithm and phonocardiogram signal application based on wavelet transform

Zhou Su, Judith Diengi Zeyi, Wu Xiao-ming, Huang Yue-shan

Abstract

BACKGROUND: The activity of heart valves can be reflected by cardiac sounds, even some heart disease can also find expression in the abnormal heart sounds. So heart sounds analysis has important clinical significance.

OBJECTIVE: Through extraction envelope and analysis of the various features of heart sounds, to detect whether there is noise or not in phonocardiogram signals so as to improve the weakness of traditional auscultation technology such as high dependence on the doctors' experience and the limited auscultation range.

METHODS: Extraction envelope curve is one of the commonly used methods to analyze heart sounds. A new method based on wavelet transform to extract the heart sound signals envelope was presented, in contrast to the common methods as Hilbert-Huang transform (HHT), mathematical morphology and average Shannon energy. Through practice, the method was proved to contain many advantages: simple algorithm, smooth feature, outstanding feature point.

RESULTS AND CONCLUSION: In order to test the accuracy of discriminating normal and abnormal heart sounds, 35 heart sounds were collected and analyzed. The experiment demonstrated that the accuracy performances were achieved by 95%, which is very useful in many aspects.

Zhou S, Judith Diengi Zeyi, Wu XM, Huang YS. Envelope extraction algorithm and phonocardiogram signal application based on wavelet transform. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu yu Linchuang Kangfu. 2011;15(30): 5615-5619. [http://www.crter.cn http://en.zglckf.com]

Department of Biomedical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong Province, China

Zhou Su★, Studying for master's degree, Department of Biomedical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong Province, China zhousuok@163.com

Correspondence to: Wu Xiao-ming, Doctor, Professor, Doctoral supervisor, Department of Biomedical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong Province, China bmxmwus@scut.edu.cn

Supported by the Guangdong Science and Technology Plan, No. 2007B031302003, 2009B030801004**

Received: 2011-03-22 Accepted: 2011-05-12

摘要

背景: 心音信号包含了大量心脏瓣膜活动的生理信息, 心音分析对诊断心脏疾病具有重要的临床意义。

目的: 旨在通过心音的包络提取, 分析心音信号的各种特征, 进而判断心音中是否包含杂音, 以改善传统听诊技术高度依赖医生经验、听诊范围受限的缺点。

方法: 提出了一种采用小波变换来提取心音包络的方法, 通过与采用希尔伯特-黄变换、数学形态学、平均香农能量等心音包络求解方法进行对比, 证明这种方法具有算法简便、曲线光滑、特征点突出等优点。

结果与结论: 将该方法用于临床真实心音的包络提取, 利用支持向量机来训练所提取心音包络的面积和小波能量两个特征参数, 判别心音信号是否明显包含杂音。选用 35 例心音数据对算法进行验证, 结果表明该算法的准确率达到 95%, 具有很强的实用性。

关键词: 心音; 小波变换; 包络提取; 支持向量机; 特征参数

doi:10.3969/j.issn.1673-8225.2011.30.026

周酥, 朱蒂, 吴效明, 黄岳山. 基于小波变换的心音包络提取算法及应用[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2011, 15(30):5615-5619. [http://www.crter.org http://cn.zglckf.com]

0 引言

有些心血管系统病变在导致心电信号出现异常之前, 首先导致心脏杂音和心音变异^[1]。因此, 通过心音分析可以提示心血管系统的某些病变, 有利于心脏疾病的及早发现, 从而采取有效的预防措施。

近年来, 传感器技术、计算机技术以及信号处理技术的飞速发展, 使得心音信号的记录和分析越来越容易, 计算机辅助分析心音技术也日益成为心音研究领域的热点。对心音信号进行分析所采用的方法有借助心电定位心音、短时傅里叶变换以及心音的时频分析等^[2-5]。在对近年内心音自动分析论文的研究中发现, 有

相当大一部分文献提到通过包络提取的方法来对心音信号进行处理与分析, 理由在于包络曲线比原始信号能够更好地反映心音的特征, 如文献[6]利用香农能量计算信号包络, 然后用短时过零率确定S1、S2心音段的精确边界; 文献[7]利用局部峰谷点进行插值运算获取心音包络, 该方法也适于包含直流成分的信号包络提取; 文献[8]建立单自由度分析模型提取心音特征波形, 再计算心音特征参数来判别心音的正常与异常。由此可见, 包络曲线在心音分析中具有重要价值。常用的包络曲线求解方法有希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)数学形态学、平均香农能量等^[9-11]。文章在对比上述各种包络提取方法的基础上, 提出了一种采用小波变换来提取心音包络的新方法, 采用

华南理工大学
生物医学工程系, 广
东省广州市
510006

周酥★, 女, 1986
年生, 湖北省天门
市人, 汉族, 华南
理工大学在读硕士
生, 主要从事生物
医学信号处理的
研究。
zhousuok@
163.com

通讯作者: 吴效
明, 博士, 教授,
博士生导师, 华南
理工大学生物医
学工程系, 广东省
广州市 510006
bmxmwus@scut.
edu.cn

中图分类号: R318
文献标识码: B
文章编号: 1673-8225
(2011)30-05615-05

收稿日期: 2011-03-22
修回日期: 2011-05-12
(20110322018/W·W)

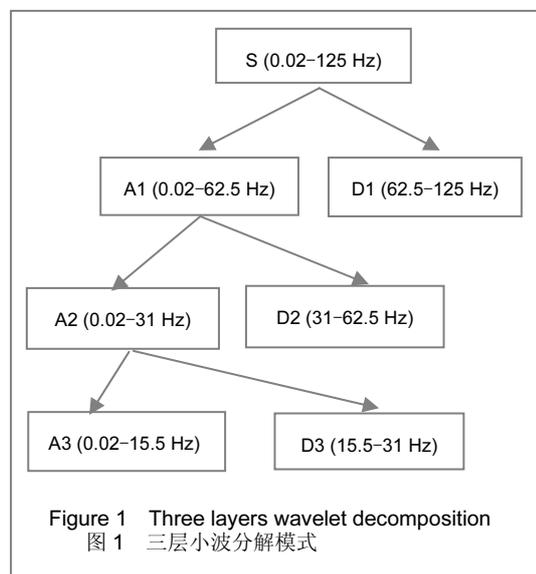
该方法得到的包络曲线平滑、峰值点突出, 为心音的进一步分析打下良好的基础。

文章的研究目的在于寻求一种判别心音是否包含杂音的有效方法。由Vapnik首先提出的支持向量机(support vector machine, SVM)是一种通用的前馈神经网络, 可用于解决模式分类与非线性映射问题。在利用小波变换提取信号包络曲线的基础上, 通过分析各类心音信号的包络曲线在频率、能量方面的差异, 最终选取包络曲线的面积和小波能量作为特征参数, 从模式识别的角度, 运用基于统计学习理论的支持向量机对这些特征参数进行训练分类, 取得了良好的效果。

1 小波变换提取心音包络的方法

1.1 小波变换提取心音包络的步骤 信号的包络提取即边缘提取, 所谓提取信号的包络, 就是通过一定的信号处理技术发现它的波形边缘。对心音信号采用合理的包络提取方法, 得到的信号包络包含原信号的有效时、频信息, 可用来识别心音的各个成分^[12-13]。

小波变换是20世纪80年代中期发展起来的一种分析方法, 具有良好的局部聚焦性能和多尺度分析的能力。小波的多尺度分解实际上是将信号分解成低频和高频两部分, 然后仅对低频部分做下一次分解, 以此类推, 得到不同频段下的低频近似系数和高频细节系数^[14-19]。图1所示为采样频率为250 Hz的信号在尺度为3时的小波分解模式, 其中S表示经过预处理后的心音信号, A代表低频, D代表高频, 下方的数字代表各系数所对应的频段。



经过文献介绍和多次实验验证得出结论, Daubechies系列小波(简称为db N)对心音信号的分解效果较理想^[20-22], 且 $N \geq 4$ 时, 重构后的近似系数可以很好地反映原信号的特征, $1 \leq N \leq 3$ 时, 重构系数不能表征信号本身的特点; 但N越大, 小波函数的构造越繁琐, 会增加处理的时间和复杂度。基于以上考虑, 选择db4小波来实现包络提取, 其算法步骤如下: ①由于不同采样环境所得心音信号的幅值有所不同, 没有统一的标准, 故首先对心音信号进行最大值归一化处理。②设计数字高通滤波器, 滤除低频噪声, 消除直流分量的影响。③对信号进行半波整流(按基线取绝对值)^[23]。④对预处理后的信号采用db4小波进行3层分解, 以第3层重构的近似系数A3作为原心音信号的包络曲线。

1.2 各种包络提取方法的分析与比较 利用小波变换提取的包络曲线见图2, 由于篇幅有限, 这里仅给出正常个体的心音和二尖瓣狭窄两类信号的心音包络。图中第1行为原始信号, 中间为小波包络, 第3行为包络曲线与原始信号边缘的吻合程度。由图可见, 无论对正常个体的心音还是包含杂音的异常心音, 小波变换得到的包络线都能够很好地反映原信号的特征。

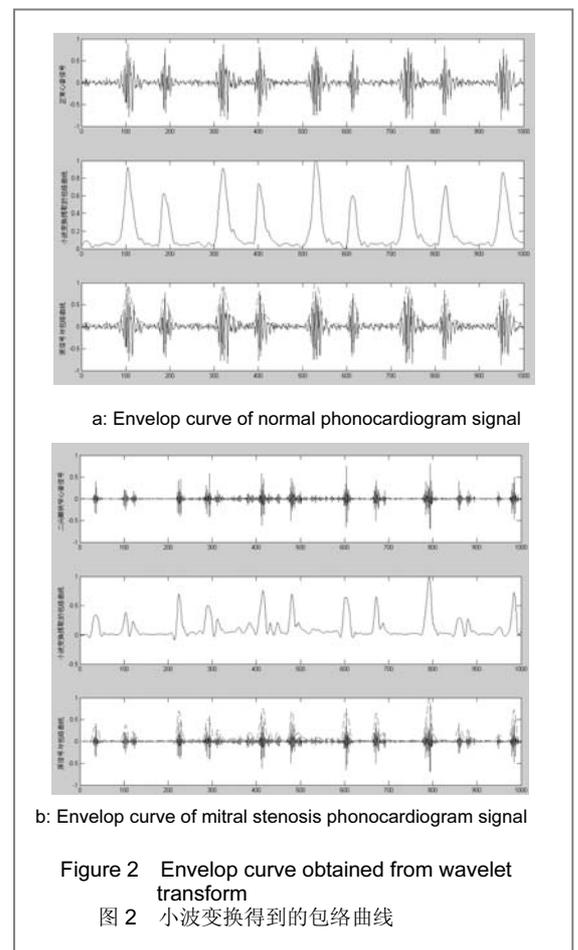


图3为利用HHT算法得到的心音包络。HHT算法于1998年由美国科学家NORDEN E. Huang等人提出，其创新之处在于固有模式函数(Intrinsic mode function, IMF)概念的提出和经验模态分解(Empirical mode function, EMD)方法的引入^[24]。先对原信号进行黄变换(作3阶EMD分解，其结果见图3a所示)，消除噪声后，以黄变换信号的幅值作实部，其希尔伯特变换作虚部，构成一个复信号，对复信号求模，即得到原信号的包络，结果见图3b第3行所示。

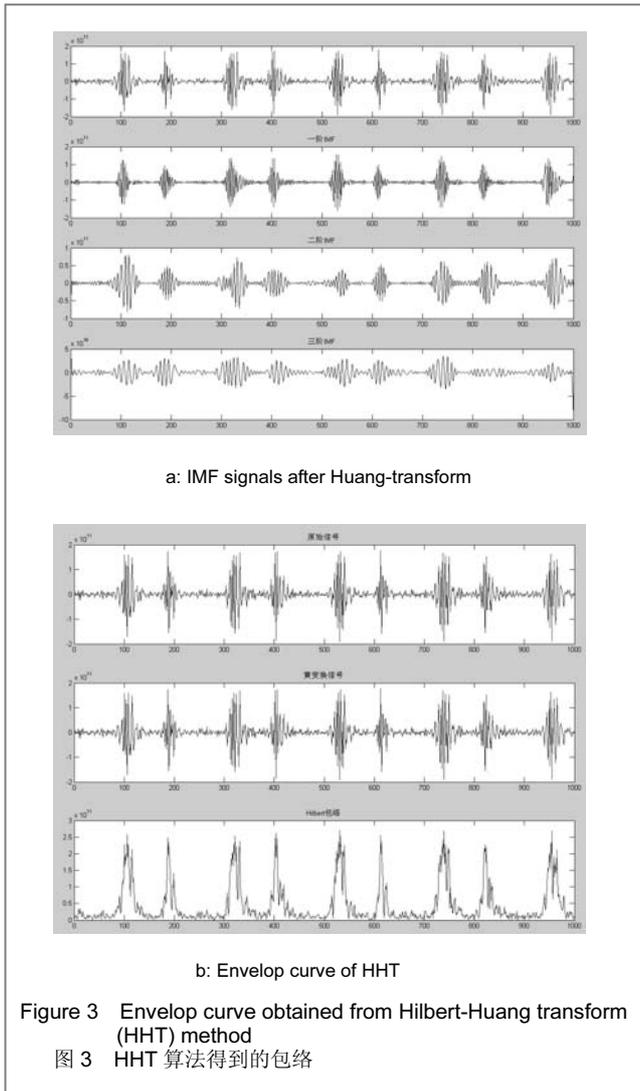


图4为数学形态学提取的包络。数学形态学最早用于二维图形的处理中，近年来国内外许多学者开始将其应用于一维信号处理的试验中，利用数学形态学实现心音信号的边缘提取，保留原信号一些必要的形状特征^[25]。形态学提取心音包络分3步：首先利用形态学滤波和全波整流对原始心音信号进行预处理，然后利用形态学闭运算提取心音包络，最后应用形态学开运算来消除噪声包络。见图4，第1行为原始心音信号，第2行为其包络曲线。

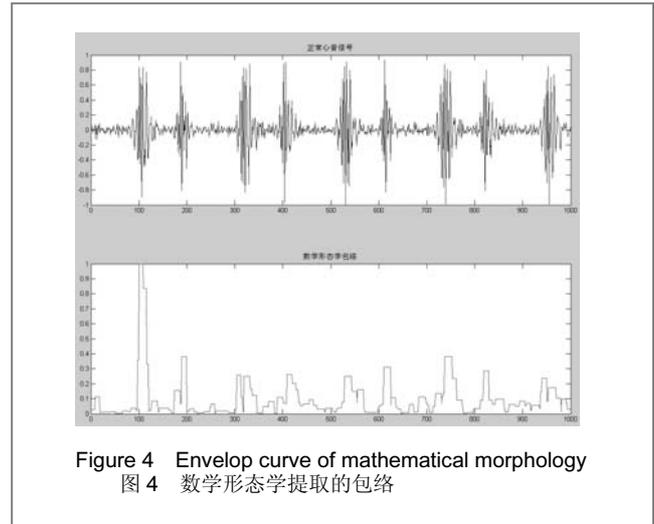
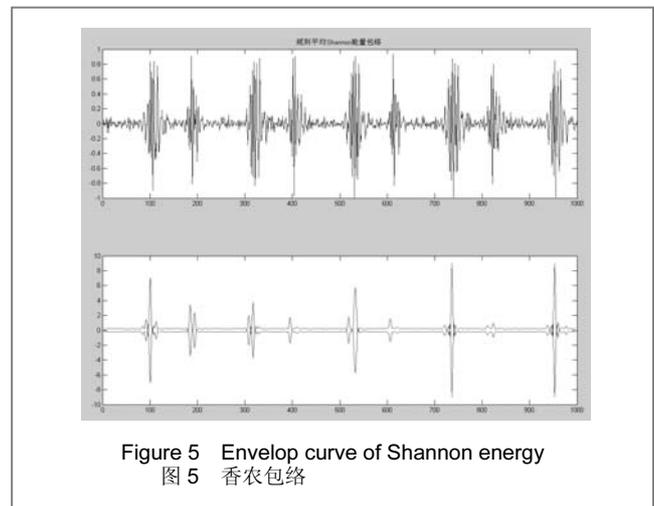


图5为采用香农能量定理提取的心音包络。



算法中所采用的对信号进行规则平均香农能量变换的公式如下：

$$E_s = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N S^2(i) * \log[S^2(i)] \quad (1)$$

公式(1)计算的是信号在一段连续时间段内的平均香农能量，在求信号的香农能量之前，先对原心音信号x(t)作归一化：

$$S = \frac{x(t)}{\max(|x(t)|)} \quad (2)$$

先按公式(1)对信号进行归一化处理；然后在依次连续的每一小段时间内按公式(2)计算信号的平均香农能量，每两段连续时间之间有一定的重复(时间段选为0.02s时，重复时间取0.01s)^[26]；最后按公式(3)计算规则平均香农能量：

$$P_a(t) = \frac{E_s(t) - M(E_s(t))}{S(E_s(t))} \quad (3)$$

通过对以上心音包络结果的对比可以看出，利用HHT算法提取的包络产生大量不光滑的毛刺，信号不够

平滑, 影响后继的分析和处理; 采用数学形态学提取心音包络的算法简单, 但算法性能的好坏与结构元素直接相关, 而结构元素的选择依赖编程者的经验, 且所得到的包络曲线峰值不明显、局部极大值较多, 不能反映S1、S2的准确位置; 香农能量计算的是信号在一段时间内的平均能量, 致使信号的时域位置发生偏移, 如果直接用来提取信号的时域特征会存在较大误差; 小波变换具有成熟的理论基础, 利用小波变换提取的心音包络曲线平滑, S1、S2峰值点位置突出, 为后续的分析处理提供很大便利。

2 小波变换提取包络方法在心音分类中的应用

2.1 数据来源 本研究所采用的心音信号大部分(28例, 其中正常个体心音信号1例, 异常心音信号包括主动脉瓣狭窄、主动脉瓣关闭不全、二尖瓣狭窄、二尖瓣关闭不全四类共27例)来源于《心脏物理检查技巧》一书中所附的英文原版心音CD, 其原始心音记录绝大部分是通过20世纪60年代四通道的剑桥磁盘记录机获得的; 另一部分(正常个体心音信号7例)来源于3M Littmann Stethoscopes数据库。由于不同来源的心音信号采样频率及幅值不同, 为了保证信号的一致性, 同时提高处理速度, 首先对信号进行250Hz重采样以及归一化, 保留主要心音频带, 消除高频杂音。

本文所采用的算法全部在MATLAB 7.4.0平台上编写。

2.2 特征参数的选择 从35例样本中抽取15例(正常3例、异常12例)作为训练集, 其余作为测试集。对样本数据进行小波变换提取出信号的包络以后, 通过比较不同类型心音信号的包络线在香农能量、小波能量、包络与横轴的面积以及各层小波系数的统计特征方面的异同, 最终选择小波能量和包络面积作为心音分类的特征参数。样本中不同类别心音信号特征参数对照见表1。

表1 不同类别心音信号的特征值
Table 1 The characteristic values of various phonocardiogram signals

Kind of phonocardiogram	Envelope area	Wavelet energy
Mitral stenosis	117.468 8	73.195 0
Mitral incompetence	254.234 2	77.055 3
Aortic incompetence	250.981 3	75.777 6
Aortic valve stenosis	238.933 9	74.645 3
Normal phonocardiogram signals	70.694	70.789 2

由上表可以看出, 正常个体的心音信号其包络面积和小波能量与带杂音信号的特征参数值均存在较大差异。

2.3 SVM预测模型的建立 SVM是基于统计学习理论的一种机器学习和分类识别方法, 其分类性能尤其是

泛化能力优于传统的分类方法。误差惩罚参数和核函数形式及其参数是影响SVM分类性能的两个关键因素。选择合适的内积核函数可以避免交换, 使所构造的分类器具有较好的推广性能和较强的抗扰动能力^[27-29]。本文通过实验对比, 选择径向基(RBF核函数)作为预测模型的核函数。SVM模型的分类型求解过程如下:

①准备训练样本 $\{(S^1, d^1), (S^2, d^2), \dots, (S^p, d^p) \dots (S^P, d^P)\}$;

②在约束条件 $\sum_{p=1}^P a_p d^p = 0, 0 \leq a_p \leq C$ (或 $a_p \geq 0$), $p=1, 2, \dots, P$ 下求解使目标函数

$$Q(a) = \sum_{p=1}^P a_p - \frac{1}{2} \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^P a_p a_j d^p d^j K(S^p, S^j)$$

最大化的 a_{0p} ; 其中 $K(S^p, S^j)$ 可以看作是 $P \times P$ 对称矩阵 K 的第 pj 项元素;

③计算最优权值 $W_0 = \sum_{p=1}^P a_{0p} d^p Y^p$

其中 Y 为隐含层输出向量;

④对于待分类样本(测试集), 计算分类判别函数

$$f(S) = \text{sgn}[\sum_{p=1}^P a_{0p} d^p K(S^p, S) + b_0]$$

根据 $f(S)$ 为1或-1决定其所属类别, 1代表测试结果为正常个体的心音信号, -1代表包含杂音的心音信号, 提示测试者可能存在某些心脏疾病隐患。

3 结果与讨论

通过对20例测试样本进行检测, 发现5例正常个体的心音样本全部被检测出来, 检出率为100%; 15例异常样本中只有1例被误判为正常, 准确率达到93%; 整个样本的检出率高达95%。

文章通过小波变换来提取心音信号的包络, 得到的结果较理想, 下一步拟将心音包络运用于S1、S2的定位及分段研究, 利用测得的参数结合心电图进行临床心功能评价。

支持向量机分类算法不依赖设计者的经验知识, 最终求得的是全局值而不是局部极值, 不会出现过学习现象, 且支持向量机具有很好的泛化性能。研究表明, 与其他方法如神经网络分类法以及选用其他特征值的SVM分类法相比^[30-31], 采用本文的方法分类正常心音与包含杂音的信号, 准确率较高。将包含杂音的心音信号分离出来以后, 单独对杂音进行生理和病理分析也是本课题下一步的研究工作。

4 参考文献

- [1] Narasimhan R, Vahe S, Franklin BS. Beijing: Science Press. 2009:97-226.
Narasimhan R, Vahe S, Franklin BS. 江洪(主译). 心脏物理检查技巧[M]. 北京: 科学出版社, 2009:97-226.

- [2] Djebbari A, Reguig FB. Short-time Fourier transform analysis of the phonocardiogram signal. Proceedings of the IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems. 2000; 2:844-847.
- [3] Abbas K, Bassam R, Kasim RM. Mitral regurgitation PCG-signal classification based on adaptive Db-wavelet. IFMBE Proceedings. 2008; 21(1):212-216.
- [4] Bassam R, Abbas AK, Kaism RM. Spectral characteristics estimation of PCG signals based on ARMAX nonlinear modeling. IFMBE Proceedings. 2008; 21(1):242-246.
- [5] Zhou Guanghu, Yu Jiaxian. Signal processing techniques and detecting-recognizing algorithms of the characteristic points for ECG, PCG and CPT. IEEE/Engineering in Medicine and Biology Society Annual Conference. 1988; 10(1):142.
- [6] Chen MH, Ye DT, Chen JT. Beijing Shengwu Yixue Gongcheng. 2007;26(1):48-51.
陈萌辉,叶大田,陈江天.基于信号包络及短时过零率的心音分段算法[J].北京生物医学工程,2007,26(1):48-51.
- [7] Li YJ, Cao ZP, Yan H, et al. Hangtian Yixue yu Yixue Gongcheng. 2010;23(2):133-136.
李延军,曹中平,严洪,等.基于局部峰谷点差值提取心音包络的一种新方法[J].航天医学与医学工程,2010,23(2):133-136.
- [8] Hu YL, Wang HB, Chen J, et al. Shengwu Yixue Gongchengxue Zazhi. 2010;27(2):425-428.
胡玉良,王海滨,陈健,等.心音时域分析的新方法研究[J].生物医学工程学报,2010,27(2):425-428.
- [9] Xu XF, Lin Y, Yan BB. Hangtian Yixue yu Yixue Gongcheng. 2008; 21(2):134-136.
许晓飞,林勇,严彬彬.基于希尔伯特-黄变换的心音包络提取[J].航天医学与医学工程,2008,21(2):134-136.
- [10] Yao XS, Guo XM, Chen J, et al. Beijing Shengwu Yixue Gongcheng. 2004;23(3):201-204.
姚晓帅,郭兴明,陈剑,等.基于数学形态学的心音包络提取与识别方法研究[J].北京生物医学工程,2004,23(3):201-204.
- [11] Hu X, Wang WL. Shengwu Yixue Gongcheng yu Linchuang. 2002; 6(4):181-184.
胡晓,王威廉.基于小波变换心音定位[J].生物医学工程与临床, 2002, 6(4):181-184.
- [12] Mallat S, Zhong S. Characterization of Signals from Multiscale Edges. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1992;14(7):710-732.
- [13] Wu YC. Lanzhou Shihua Zhiye Jishu Xueyuan Xuebao. 2010; 10(2): 29-31.
吴玉春.心音信号包络提取和识别方法的比较分析研究[J].兰州石化职业技术学院学报,2010,10(2):29-31.
- [14] Wu XM, Cen RJ, Liang JD, et al. Jinan Daxue Xuebao: Ziran Kexueban. 1997;18(Suppl): 53-57.
吴效明,岑人经,梁家定,等.心功能参数小波分析原理[J].暨南大学学报:自然科学版,1997,18(增刊): 53-57.
- [15] Wang Y. Chengdu: Sichuan Daxue. 2005.
王芸.基于小波变换的心音信号分析研究[D].成都:四川大学,2005.
- [16] Guo XM, Tang LP. Jisuanji Yingyong Yanjiu. 2010;27(12):4555-4557.
郭兴明,汤丽平.基于小波变换和样本熵的心音识别研究[J].计算机应用研究,2010,27(12):4555-4557.
- [17] Wei Z, Zheng L, Li ZM. Yiliao Weisheng Zhuangbei. 2010;31(10): 17-19.
韦哲,郑蕾,李战明.小波多分辨率理论在心音信号分析中的应用[J].医疗卫生装备,2010,31(10):17-19.
- [18] Ma YH, Cheng XF. Weixingji yu Yingyong. 2011;30(1):72-74.
马永华,成谢锋.小波和神经网络在心音识别中的应用[J].微型机与应用,2011,30(1):72-74.
- [19] Quan XF, Huang WH. Gongye Kongzhi Jisuanji. 2010;23(8):79-80.
全雪峰,黄文海.基于小波分析和概率神经网络的心音诊断研究[J].工业控制计算机,2010,23(8):79-80.
- [20] Dan ZY. Wuxi: Jiangsu Daxue. 2006.
单正娅.基于人工神经网络及小波分析的心音诊断系统的研究[D].无锡:江苏大学,2006.
- [21] SAMIT A, KOUSHIK H, GOUTAM S. Detection of cardiac abnormality from PCG signal using LMS based least square SVM classifier. Expert Systems with Applications. 2010;37(12): 8019-8026.
- [22] Rajan S, Doraiswami R, Stevenson M, et al. Wavelet based bank of correlators approach for phonocardiogram signal classification. Proceedings of the IEEE-SP International Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis. 1998; 77-80.
- [23] Wu XM, Cen RJ, Wu YP, et al. Shengwu Yixue Gongchengxue Zazhi. 1996;13(4):349-352.
吴效明,岑人经,吴云鹏,等.心音信号检测的一种新方法[J].生物医学工程学报,1996,13(4):349-352.
- [24] Lin Y, Xu XF. Zhongguo Shengwu Yixue Gongcheng Xuebao. 2008; 27(4):485-489.
林勇,许晓飞.基于经验模式分解的心音自动分段算法[J].中国生物医学工程学报,2008,27(4):485-489.
- [25] Guo XM, Chen J, Xiao SZ. Shengwu Yixue Gongchengxue Zazhi. 2004;21(5):832-835.
郭兴明,陈剑,肖守中.基于数学形态学的心音信号识别方法[J].生物医学工程学报,2004,21(5):832-835.
- [26] Wu YC. Zhongqing: Zhongqing Daxue. 2009.
吴玉春.心音信号自动识别算法的研究[D].重庆:重庆大学,2009.
- [27] Zhang XG. Zidonghua Xuebao. 2000;26(1):32-41.
张学工.关于统计学习理论与支持向量机[J].自动化学报,2000,26(1):32-41.
- [28] Yuan YB, Yan J, Xu CX. Jisuanji Xuebao. 2005;28(1):9-17.
袁玉波,严杰,徐成贤.多项式光滑的支持向量机[J].计算机学报,2005, 28(1):9-17.
- [29] Feng GH. Jisuanji Gongcheng yu Yingyong. 2011;47(3): 123-128.
奉国和.SVM分类核函数及参数选择比较[J].计算机工程与应用, 2011, 47(3): 123-128.
- [30] Sepideh B, Amir G. Heart sound reproduction based on neural network classification of cardiac valve disorders using wavelet transform of PCG signals. Computer in Biology and Machine. 2009; 39:8-15.
- [31] Maglogiannis I, Loukis E, Zafriropoulo SE. Support vectors machine based identification of heart valve diseases using heart sounds. Computer Methods and Programs in Biomedicine. 2009; 95(1):47-61.

来自本文课题的更多信息——

基金资助: 广东省科技计划项目(2007B031302003):

课题名称: 基于无线穿戴式检测技术的社区数字医疗健康服务系统; 广东省科技计划项目(2009B030801004): 课题名称: 面向社区家庭的医疗服务与检测仪器。

作者贡献: 第一作者负责方法设计及撰写论文; 第二作者负责资料搜集及方法总结; 第三作者提出总体设计思想及评估, 对文章关键部分修改; 第四作者评估最终结果。非盲法评估。

致谢: 感谢科学出版社和 3M Littmann Stethoscopes 数据库为本文的研究提供心音数据。

利益冲突: 课题未涉及任何厂家及相关雇主或其他经济组织直接或间接的经济或利益的赞助。

伦理批准: 没有与相关伦理道德冲突的内容。

创新性点说明: 提取包络主要采用希尔伯特-黄变换、数学形态学、香农能量等。实验采用小波变换提取包络, 方法简单, 效果也较好。目前心音分类方法主要有神经网络和支持向量机, 实验采用支持向量机算法, 适用于小样本分类, 特征值选用了以前文献中尚未用到的包络面积和小波能量, 且分类结果与实际情况的符合率与文献中所得结果相当甚至更高。